

Текст доклада на семинаре

Тема: Лавинно-стримерный переход

Автор: Пек Борис

===== Слайд 01 =====

Представлены только результаты моделирования. Без сравнения с экспериментальными данными и научными статьями по этой тематике.

===== Слайд 02 =====

Постановка задачи... Общие параметры моделей. Газовая смесь близкая к воздуху по составу. 45 реакций. Кратко рассказать:

Источниками свободных электронов являются 2 реакции ионизации молекул N_2 и O_2 , а так же 4 реакции отлипания электронов от отрицательных ионов кислорода.

За гибель свободных электронов ответственны реакции диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов и 3 реакции прилипания к кислороду.

Кроме реакций рождения и гибели электронов, а так же других реакция связанных с изменением заряда частиц, учитывается много реакций, влияющих лишь на энергетический баланс системы. Это реакции возбуждения электронных и колебательных уровней, реакции диссоциации молекул и реакции ион-ионной рекомбинации.

===== Слайд 03 =====

Использовался пакет CFD-ACE. Для решения данных задач были задействованы следующие модули: течений (Flow), химии (Chemistry/Mixing), плазмы (Plasma), электрический (Electric) и кинетический (Kinetic). Т.е. решалась такая система уравнений:

Уравнение Пуассона. Объемный заряд складывается из слагаемых, связанных с распределением электронов и ионов разных сортов. Y_i – массовая доля частиц i -го типа, $\rho_{газ}$ – плотность газа.

Уравнение Нернста-Планка для ионов, атомов и молекул. Здесь S_i – функция источника частиц. Причем, только рождения частиц i -ого типа. В левой части уравнения присутствуют два слагаемых: дрейфовое (движение частиц вдоль поля) и диффузионное (связанное с тепловым движением частиц).

Кинетическое уравнение для электронов в приближении энергетического спектра. f_0 – функция распределения электронов по энергии, которая собственно и вычисляется в CFD. Эта функция изотропна и зависит только от координаты, энергии и времени. Расчет этой функции по первому уравнению дает симметричную картину, поэтому вводится так же первая поправка f_1 , которая рассчитывается из f_0 как показано во втором уравнении.

Рассмотрим более подробно первое уравнение. Справа стоит функция источника частиц. Она состоит из нескольких слагаемых, которые расписаны ниже. Реакции ионизации и отлипания являются источником рождения свободных электронов, реакции рекомбинации и прилипания – источником гибели, а реакции возбуждения электронных и колебательных уровней влияют только на энергию свободных электронов. Здесь ν – соответствующие частоты (зависимость частоты от энергии можно получить из сечений реакций), u_{ion} – потенциал ионизации и u_{exc} – порог возбуждения ($\nu(E) = 0$ при $E < u_{exc}$). При отлипании здесь предполагается, что образуется свободный электрон с нулевой энергией. А сам источник для реакций отлипания не зависит от функции распределения, т.к. отлипание происходит при столкновении тяжелых частиц и важна лишь их интенсивность.

В левой части уравнения все также есть дрейфовое и диффузионное слагаемые, но кроме них есть слагаемые, описывающие изменения функции распределения по энергетической координате. “Дрейфовое” слагаемое учитывает “среднее” изменение энергии свободных электронов при взаимодействии с электрическим полем, а второе – диффузионное движение электрона по “энергетической оси”, связанное с хаотическим движением электронов, в результате которого, они могут, как получать энергию от поля при движении против поля, так терять ее при движении вдоль него.

===== Слайд 04 =====

Температура атомов и молекул в области задавалась фиксированным значением 300К. Это оправданно тем, что ионизационные процессы будут рассчитываться в очень малом промежутке времени (порядка десятка наносекунд). И за это время температура газа не успела бы заметно измениться.

Однородное поле. Рассказать про граничные и начальные условия. Разность потенциалов на электродах 5кВ выбрана, чтобы лавина гарантировано перешла в стример. При этом среднее поле около 50кВ/см. Для сравнения, в различной технической литературе приводится цифра 24.5кВ/см – напряженность поля, при которой начинаются лавинные процессы в воздухе.

===== Слайд 05 =====

Расчетные сетки сделаны довольно грубыми, чтобы время расчета модели было приемлемым. Т.к. решается сложная система уравнений и учитывается много реакций...

===== Слайд 06 =====

На контурных графиках слева направо представлены распределения концентрации электронов, электрического заряда и модуля напряженности электрического поля в три различных момента времени, соответствующих лавине, лавинно-стримерному переходу и сформированному стримеру.

Строка 1.

Лавина движется от катода (правая граница области) к аноду (левая граница области). Лавина распространяется за счет быстрого движения электронов. За счет диффузии начальный пакет электронов расплывается во всех направлениях. Но из-за дрейфового движения электронов электронное облако вытягивается вдоль электрического поля. Образованные в результате ионизации положительные ионы начинают медленно дрейфовать к аноду. В результате этого происходит пространственное разделение заряда. Наличие объемного электрического заряда, конечно же, влияет на электрическое поле, но при такой концентрации заряда, вносимое им возмущение пренебрежимо мало.

Строка 2.

Образованный лавиной за несколько наносекунд заряд начал уже существенно влиять на внешнее электрическое поле. Основная часть электронного облака еще не достигла анода и продолжает двигаться к нему.

Строка 3.

Видим, что максимум концентрации электронов находится в очень небольшой области, а именно – в головке стримера. При этом концентрация электронов в хвосте стримера отличается от максимума всего в два раза, но из-за того, что в канале присутствуют так же и положительные ионы, суммарный заряд их примерно равен нулю. А значит, в хвосте стримера образовалась область квазинейтральной плазмы. В головке же стримера суммарный заряд положителен. Электрическое поле в плазменном канале сильно ослаблено, а перед головкой стримера имеется скачок поля, который является определяющим фактором в процессе прорастания стримера.

===== Слайд 07 =====

Линейные графики вдоль оси симметрии.

Слева: концентрация электронов в три момента времени в линейном и логарифмическом масштабе по оси Y. В лавине концентрация электронов порядка 10^6 , а в стримере – 10^{20} $1/\text{м}^3$. В лавине распределение электронов носит диффузионный характер, а в стримере есть максимум в головке.

В центре: объемная плотность заряда. Справа: электрическое поле. Видим, что в промежутке между головкой стримера и анодом поле и суммарный заряд не равны нулю, хоть и понижены. Это связано с тем, что лавина перешла в стример, не достигнув анода, и этот промежуток заполнен ионами, оставшимися от лавины.

===== Слайд 08 =====

Лавина быстро распространяется к аноду за счет движения электронов, а образованные в результате ионизации положительные ионы медленно дрейфуют назад к катоду.

Лавина, не достигнув анода, перерождается в стример и образуется много ионов в приэлектродной области.

Сформировавшийся стример прорастает к катоду. Максимум концентрации положительных ионов расположен в головке стримера, где наиболее интенсивно идут процессы ионизации.

===== Слайд 09 =====

Максимальная концентрация отрицательных ионов соответствует области максимума реакций прилипания. Видно, что эта область находится позади лавины и в хвосте стримера.

===== Слайд 10 =====

Из линейных графиков видно, что концентрация отрицательных ионов на порядок ниже концентрации положительных.

===== Слайд 11 =====

Видим, что пространственная картина интенсивности ионизации молекулярного азота и кислорода почти одинаковы и отличаются лишь численными значениями, причем в лавине различие пренебрежимо мало, а в сформировавшемся стримере интенсивность ионизации азота на 38% больше. Далее рассмотрим процесс лавинно-стримерного перехода подробнее.

===== Слайд 12 =====

Из-за того, что электронное облако в процессе движения лавины сильно расплывается по направлению к аноду, некоторые электроны успевают достичь анода и вызвать там всплеск ионизации, когда основная часть электронного облака еще продолжает движение к аноду.

В данной модели так получилось, что непосредственно у анода образовалась область, где интенсивность ионизации того же порядка, что и в лавине.

В процессе лавинно-стримерного перехода объемный заряд в области продолжает увеличиваться, и его поле становится сравнимым с внешним приложенным полем, а затем оно становится определяющим. Т.к. внешнее поле однородно и на аноде задана реакция гибели электронов, интенсивность ионизации вблизи поверхности анода становится меньше чем в головке лавины и положительный стример начинает прорастать к катоду из головки лавины, а не от анода.

В сформированном положительном стримере максимум ионизации находится в очень узкой области – в головке стримера. В хвосте стримера ионизация тоже происходит, но ее интенсивность на два порядка меньше.

===== Слайд 13 =====

Реакции отлипания тоже являются источником свободных электронов. Из контурных графиков видно, что отлипание максимально в хвосте лавины и в хвосте стримера.

===== Слайд 14 =====

Линейные графики интенсивностей реакций ионизации и отлипания вдоль оси симметрии. Графики представлены в логарифмическом масштабе по оси Y. Видно, что интенсивность реакций отлипания на 6 порядков меньше интенсивности реакций ионизации в лавине, на 4 порядка в хвосте стримера и на 6 порядков – в головке стримера.

===== Слайд 15 =====

Для сравнения с экспериментальными данными полезно вывести контурные графики интенсивности свечения, т.е. излучения в единицу времени. На фотоснимках стримеров на самом деле получаются интегральные изображения за время, равное времени экспозиции. Но измерительная техника постоянно совершенствуется и уже сейчас некоторые научные группы используют время экспозиции порядка сотен пикосекунд.

Поскольку в данной модели реакции перехода возбужденных частиц в другие состояния и в основное состояние не учитываются, то для оценки интенсивности свечения используются реакции возбуждения.

Все реакции возбуждения были условно разделены по энергии на три диапазона: инфракрасный, оптический и ультрафиолетовый. И по формуле рассчитана интенсивность свечения в каждом из них. Для видимого света интенсивность излучения получилась порядка 100 кВт/см^3 .

===== Слайд 16 =====

В следующей задаче разность потенциалов на электродах и соответственно внешнее поле были увеличены в два раза, чтобы лавина переросла в стример вдали от анода с образованием двух стримеров: отрицательного (анодонаправленного) и положительного (катодонаправленного).

На слайде приведены контурные графики интенсивности реакции ионизации азота в различные моменты времени для анализа лавинно-стримерного перехода. Все стадии были описаны в предыдущей задаче. За исключением всплеска ионизации у анода отличий не видно.

А где же отрицательный стример? На самом деле он есть, просто в приведенном масштабе значений интенсивности его не видно.

===== Слайд 17 =====

На верхнем графике справа отчетливо видна область соответствующая головке отрицательной (анодонаправленной) лавины. Головка отрицательного стримера больше чем у положительного и она расширяется в процессе прорастания.

Из нижнего графика справа видно, что интенсивность ионизации отрицательного стримера на два порядка меньше, чем у положительного.

===== Слайд 18 =====

Как видно из графиков модуля электрического поля, поле в хвостах стримеров понижено, а максимальные значения поля перед головками в данный момент времени больше внешнего поля в 1.5 раза для отрицательного стримера и 5.5 раза для положительного.

Из графиков распределения электрического заряда видно, почему стримеры называются положительным и отрицательным. Так же видно, что суммарный заряд всех заряженных частиц в хвостах стримеров близок к нулю.

К сожалению, размер элементов расчетной сетки в области больших градиентов оказался недостаточно малым. Этим объясняются полученные особенности на оси симметрии в рассчитанной модели.

===== Слайд 19 =====

Слева на слайде представлены контурные графики интенсивности свечения в обычном линейном масштабе. На них виден только резкий максимум в области головки положительного стримера. Поэтому на графиках справа те же распределения показаны в логарифмическом масштабе. Минимальное значение по шкале 10^5 выбрано таким образом, чтобы было хорошо видно область свечения в отрицательном стримере. Видно, что интенсивность излучения видимого света в отрицательном стримере на 2 порядка ниже, чем в положительном.

===== Слайд 20 =====

Задачи с однородным полем были рассмотрены, чтобы было проще проанализировать физические процессы, происходящие в процессе лавинно-стримерного перехода. С практической точки зрения гораздо важнее рассмотреть стримеры в неоднородном поле, поскольку они существенно чаще встречаются в природе. Для начала была рассчитана модель со слабонеоднородным полем.

На слайде показаны распределения концентрации электронов в разные моменты времени. Сферический электрод большего радиуса является катодом, и от него лавина движется к аноду, втягиваясь в область с более сильным электрическим полем. Когда первые свободные электроны достигают анода, возле его поверхности начинается интенсивная ионизация газа. Концентрация свободных электронов близи анода резко возрастает, и от анода начинает прорастать положительный стример. Такой стример обычно называют отраженным. Поскольку стример вблизи анода начинает формироваться еще до того, как лавина достигнет его, то концентрация свободных электронов в межэлектродной области в этом случае на несколько порядков выше, чем было в случае с однородным полем. Следовательно, у него выше интенсивность ионизации и скорость прорастания к катоду.

===== Слайд 21 =====

На контурных графиках модуля электрического поля хорошо видно процесс образования и прорастания положительного стримера. Отчетливо видны область повышенного электрического поля перед головкой стримера и область пониженного электрического поля в хвосте стримера, что соответствует области квазинейтральной плазмы. Возле анода наблюдается также область распада плазмы. Лучше всего это видно на линейном графике вдоль оси симметрии.

===== Слайд 22 =====

На линейном графике представлены начальное невозмущенное распределение электрического поля и процесс прорастания положительного стримера к катоду. Резкие изломы на графиках объясняются грубой сеткой в этой области модели. Из графиков видно, что максимум электрического поля перед головкой стримера постепенно выходит на насыщение.

Видна область пониженного поля в плазменном канале. Поле в нем не нулевое, оно примерно на два порядка ниже, чем поле в головке стримера. Так же хорошо видна область распада плазмы, которая постепенно увеличивается.

===== Слайд 23 =====

Из графиков интенсивности излучения в видимом диапазоне видим, что максимум свечения в небольшой области головки стримера и именно его регистрирует фотодетектор в экспериментах. В рассчитанной модели в развитом стримере интенсивность свечения получилась порядка 100 МВт/см^3 . Это очень большая величина, но если умножить на приблизительный объем этой излучающей области ($\sim 5 \cdot 10^{-8}$, если считать ее цилиндром), то получим мощность порядка 5 Вт. Это вполне разумная цифра, если учитывать время существования стримера, которое составляет порядка 500 наносекунд по экспериментальным данным.

===== Слайд 24 =====

Но модель со слабонеоднородным полем с практической точки зрения тоже малоинтересна, т.к. даже на тщательно обработанных поверхностях электродов всегда имеются выступы с очень малым радиусом кривизны, и локальное поле возле них сильно нелинейно. Именно возле этих выступов должны возникать лавины и стримеры в газах.

В четвертой представленной задаче радиус анода всего 50 мкм, а коэффициент неоднородности поля примерно равен десяти.

Процесс лавинно-стримерного перехода такой же, как и в предыдущей задаче. Возле анода начинается резкий рост концентрации электронов из-за процессов ионизации. Когда поле образованного объемного заряда становится того же порядка, что и внешнее поле, а затем превосходит его, стример начинает прорастать к катоду.

===== Слайд 25 =====

На линейных графиках вдоль оси симметрии в логарифмическом масштабе видно, что после прохождения лавины в области осталось немало свободных электронов, их концентрация порядка 10^{16} 1/м^3 . Благодаря им скорость прорастания стримера выше, чем в случае с однородным полем. Концентрация электронов в головке стримера порядка 10^{24} 1/м^3 , а в плазменном канале она на порядок меньше.

===== Слайд 26 =====

На графиках распределения электрического заряда хорошо видны положительная головка стримера и область квазинейтральной плазмы в хвосте стримера.

===== Слайд 27 =====

На графиках распределения модуля электрического поля хорошо видны резкий максимум поля перед головкой стримера и область пониженного поля, которая соответствует плазменному каналу.

===== Слайд 28 =====

На линейном графике представлены начальное невозмущенное распределение электрического поля и процесс прорастания положительного стримера к катоду. Резкие изломы на графиках объясняются грубой сеткой в этой области модели. Из графиков видно, что максимум электрического поля перед головкой стримера постепенно выходит на насыщение.

===== Слайд 29 =====

Из графиков интенсивности излучения видим, что максимум свечения в небольшой области головки стримера. На нижнем графике справа представлено распределение электрического поля и проведена пунктирная линия, чтобы наглядно показать, что максимум электрического поля находится перед светящейся головкой в положительном стримере.

===== Слайд 30 =====

Выводы

Подробно рассмотрен процесс лавинно-стримерного перехода в рассчитанных моделях.

Все стримеры, полученные в результате моделирования, являются либо положительными, либо присутствуют оба стримера, причем у отрицательного стримера интенсивность реакций ионизации и интенсивность свечения в оптическом диапазоне на два порядка меньше.

У положительного стримера головка сужается в процессе прорастания, а у отрицательного – расширяется.

У положительного стримера есть четко выраженный плазменный канал, поле в котором сильно понижено.

Скорость прорастания положительного стримера, образовавшегося в межэлектродном промежутке меньше скорости прорастания отраженного стримера, прорастающего от анода навстречу лавине.

Из-за того, что в последнем случае концентрация свободных электронов в межэлектродном промежутке в направлении прорастания стримера значительно выше.